

## Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

FTAMP 53.01.33.01  
ӘӨЖ 004.032.26

[DOI: 10.4411/s0031-019-401](https://doi.org/10.4411/s0031-019-401)

Қ.Е.Ермаханбетов

*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан  
(E-mail: k.ermakhanbetov@tttu.edu.kz)*

### Авиация үшін ауа-райын болжауда нейрондық желілерді қолдану

Қазір ауа-райын болжау – әлеуметтік-экономикалық белсенділердің ең көп талқылайтын тақырыбы. Ол сондай-ақ теңіз, ауыл шаруашылығы, әуе қозғалысы және орман шаруашылығын қамтитын әртүрлі мемлекеттік және жеке секторларда қолданылуына байланысты кең таралған қызығушылықты тудырады. Соңғы оқиғалар климаттық өзгерістердің күрт жылдамдықпен орын алуына әкеліп соқты, бұл ауа-райын болжаудың ескі әдістерін тиімділігін төмендетеді, көбірек қарбалас және сенімсіз етеді. Бұл қиындықтарды жеңу үшін ауа райын болжаудың жетілдірілген және тиімді әдістері қажет. Бұл мақалада белгілі бір қаланың ауа-райын болжау және әртүрлі қалалардағы әртүрлі ауа райы жағдайларын салыстыру үшін жасанды нейрондық желілерді пайдалана отырып, машиналық оқыту тәсілдері сипатталған. Біз эмпирикалық түрде жасанды нейрондық желілер GDAS бағалауына қарағанда өте төмен ауытқулар жасайтынын көрсетеміз. Осылайша, күнделікті ауа райы болжамы үшін дәл дерлік нәтижелерді болжау.

*Түйін сөздер: Ключевые слова:* Жасанды нейрондық желілер; AI ауа райы болжамы; Машиналық оқыту; Ауа райын болжау; Ауа райы болжамы

### *Kipicne*

Соңғы онжылдықта статистикалық және машиналық оқыту әдістерін қолдана отырып, ауа-райын болжауға арналған ең озық нейрондық желі үлгілерін жасауға көптеген үлкен талпыныстар жасалды, олар перспективалы нәтиже берді. Өсіп келе жатқан әдебиеттер жинағы температура, қысым, ылғалдылық сияқты климаттық факторлардың ауа райына қалай әсер ететінін зерттеді. Гарвард қоғамдық денсаулық мектебінің зерттеуі температура мен жауын-шашынның жұқпалы аурулар мен патогендердің таралуын қолдайтын/қарсы болатын екі маңызды фактор екенін көрсетеді. Жұқпалы аурулар адам өмірі мен жануарларға бірден әсер етеді, ал климаттың өзгеруі баяу дамиды және жағдай болып табылады, оның қауіптері жеке емес болып көрінуі мүмкін және олардың себептері бүкіл әлемге таралады. Ауа райын болжау әдістері температура, қысым және ылғалдылық және т.б. сияқты әртүрлі атмосфералық қасиеттерден алынған деректерді пайдалана отырып, қоршаған ортаның күйін модельдейді және ауа райын болжайды. Ең көп қолданылатын әдістер - Кальман сүзгілері және нейрондық желілер.

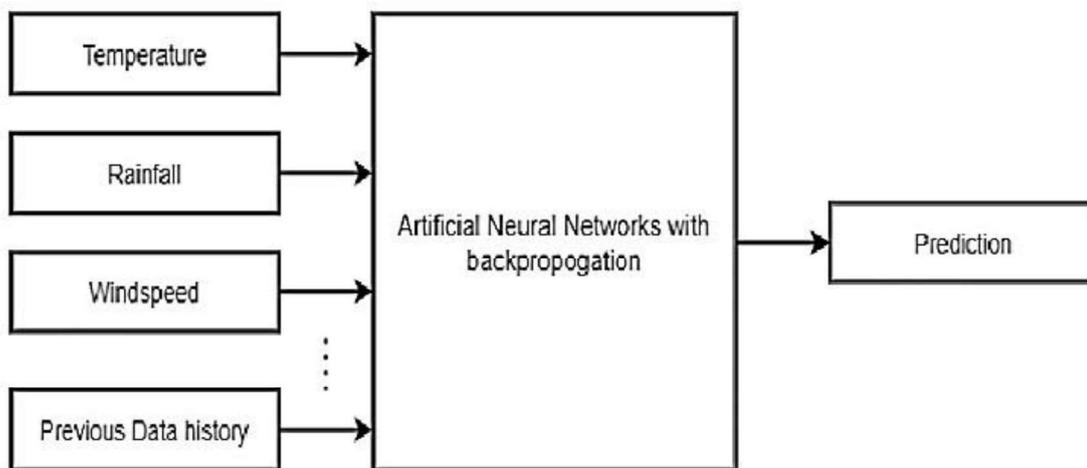
Ауа райы болжамы есептері когнитивті есептеулерге сызықтық емес деректерді оқуға және болашақ ауа райын болжау үшін бақыланатын деректерден талдау үшін ережелер мен үлгілерді жасауға мүмкіндік береді. Нейрондық желілерді пайдалану сенімдірек нәтижелерді бере алады. Бұл желілер шығарған қателер бұл жағдайда мүлдем жойылуы немесе жойылмауы мүмкін. Дегенмен, алдыңғы болжамдардан айырмашылығы, дәлдік артады. Өткен жылдардағы деректердің үлкен көлемін генерациялаумен белгілі бір қаланың/қаланың немесе штаттың климаттық жағдайларын болжау үшін машиналық оқыту алгоритмін үйрету үшін пайдалануға болатын ауа-райына қатысты орасан зор ақпарат бар. Күтпеген COVID-19 пандемиясына байланысты, зерттеу көрсеткендей, көмірқышқыл газы шығарындыларының күнделікті -17% -ға уақытша қысқаруы болды, бұл жыл сайын шамамен -4,2-ден -7,5% -ға дейін төмендейді, бұл климаттың өзгеруін шектейді 1,5°C жылыну. Бұл құлдырауға әкелген негізгі секторлар коммерциялық кәсіпорындар, жер үсті көліктері, әртүрлі өңдеуші өнеркәсіптер, тұрғын үй және авиация өнеркәсібі болып табылады.

## Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Қазіргі жағдайда ауа-райын болжау әлдеқайда қиын болды. Табиғи апаттар, соның ішінде циклондар, дауылдар, жер сілкінісі, орман өрттері және цунамилер климаттың өзгеруінің салдары ретінде үнемі дерлік орын алып, апатты залал келтіреді. Бұл, әрине, ауа-райын болжау модельдерінің болашақтағы ауа-райын болжау үшін алдыңғы деректерді қалай пайдаланғанын өзгертеді. Ауа райын дәл бақылау қазіргі қиын уақытта өте маңызды және пайдалы. Біз 2-бөлімдегі әдебиеттік сауалнамадан бастаймыз, онда өткен жұмыстарға қысқаша шолу және тақырып бойынша білім беріледі. 3-бөлімде ауа-райын болжау үшін машиналық оқыту әдісін ұсынамыз. 4-бөлімде эксперименттерді орындау параметрлері сипатталған. 5-бөлім бағалау нәтижелерін түсіндіреді, содан кейін жұмысты аяқтайтын 6-бөлім.

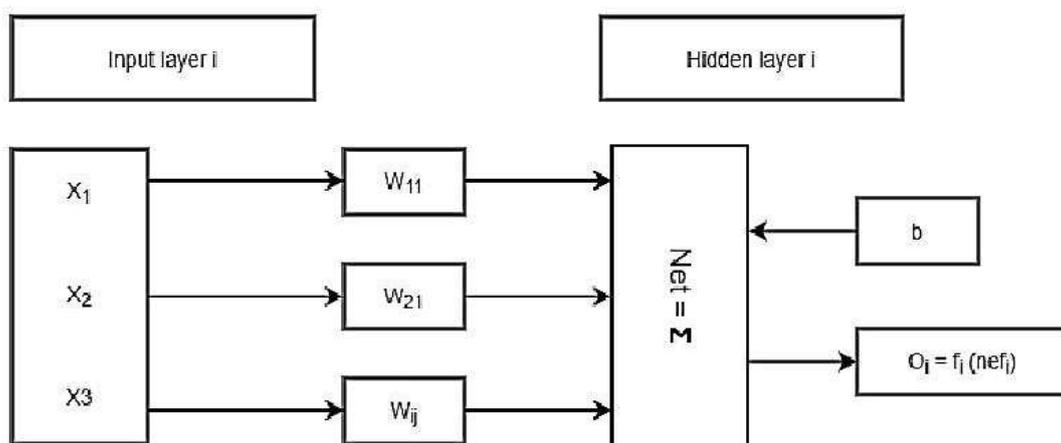
### Әдістер мен материалдар

Ауа райын болжау – ең технологиялық талаптардың бірі. Ауа-райын керемет төмен ауытқулармен жобалау және лайықты нәтижеге қол жеткізу өнер. Нәтижелерді болжау үшін пайдаланушылармен оңай әрекеттесе алатын python көмегімен қолданба үшін графикалық пайдаланушы интерфейсі (GUI) әзірленді. Әзірленген қосымша белгілі бір қаланың ауа райын болжауға және әртүрлі қалалардағы әртүрлі ауа райы жағдайларын салыстыра алады. 1 және 2-суреттер ұсынылған схеманың толық жұмыс барысын көрсетеді. Деректер жинағы орташа температура, максималды температура, ең төменгі температура, қысым, жел жылдамдығы, желдің максималды жылдамдығы, шық нүктесі, көріну және т.б. сияқты әртүрлі ауа райы атрибуттарынан тұрады. Өткен жылдардағы бұл параметр мәндері жиналып, машинада оқыту үлгілерінің тізіміне жіберіледі. Ауа-райы бағалануы керек ағымдағы деректер де болжау үшін жіберіледі. Ұсынылған жүйеде қажетті мақсаттар мен нәтижелерді алу үшін біз жасанды нейрондық желілерді олардың бірлік деңгейінде жан-жақты талдау жасаймыз.



Сурет 1. Болжау жүйесі.

## Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»



Сурет 2. Перцептрон моделі.

Біз авиацияның осы метеорологиялық болжамдарға әсерін зерттеу үшін 2020 жылдың наурыз-мамыр айлары аралығындағы жаһандық метеорологиялық болжамдарды зерттейміз. Біз осы кезеңде бүкіл әлем бойынша бақылаулардың азайғанын көріп отырмыз. Біз деректерімізді [cdsc.noaa.gov](https://cdsc.noaa.gov) сайтынан жинадық. Метеорологиялық болжамдарға арналған құрлық/топырақ, мұхит, теңіз, мұз және атмосфералық модульдер сияқты модельдік жұптың бірнеше факторлары. Метеорологиялық бағалауға арналған ең жақсы көрсеткіштердің бірі атмосферада төменгі рельефтерден 0,27 гПа дейін болатын сигма қысым қабаттарынан алынған деректер болып табылады (Sela, 2009). Осыған байланысты метеорологиялық мониторингтің егжей-тегжейлі зерттеуі NCEP (2018) берілген. Біз зерттеуімізге 192 сағатқа дейінгі болжам деректерін қостық. Жел жылдамдығы, көмірқышқыл газы, ылғалдылық, атмосфералық қысым және температура сияқты әртүрлі климаттық факторлар біздің болжамды азайтады. Мұнда біз GDAS бағалауында бұрын айтылғандай (Петерсен, 2016) коммерциялық рейстерде маңызды рөл атқаратын температура дәлдігінің төмендеуін атап өтеміз.

COVID-19 індетінің метеорологиялық болжамның дәлдігіне әсерін зерттеу үшін біз 2020 жылдың наурыз-мамыр айлары (Чен, 2020 ж.) (құлыптау кезеңінде) метеорологиялық болжам деректерін наурыздан мамырға дейінгі болжамды деректердің орташа мәнімен салыстырамыз және салыстырамыз. 2015-2019. Біз өз тәжірибемізді Үндістанның Бангалор, Мумбай, Колката, Ченнай және Дели сияқты әртүрлі қалаларында жүргіздік. Бұл қалалар елдегі климаттық өзгерістерге негізгі үлес қосады. Сонымен қатар, дәлдікке бұл әсер 2020 жылдың климаттық атрибуттарынан айырмашылығы 2020 жылдың наурыз-мамыр айларындағы COVID-19 індетімен байланысты екенін көрсету үшін біз 2020 жылдың ақпан айына ұқсас зерттеуді дүниежүзілік құлыптаудан бұрын жүргіземіз.

MATLAB (R202) жүйесінде қол жетімді GUI nstart нейрондық желісі кері таралу принципі бар алға жіберу ANN пайдалана отырып, метеорологиялық деректерге тәжірибе жасау үшін пайдаланылады. Қағаз (Maqsood және т.б., 2004) MLPN, ERNN бойынша ұқсас зерттеу жүргізеді. Біз тәжірибелерімізді қарапайым нейрондық желі моделінен бастадық және оның негізгі деңгейінде жасанды нейрондық желілердің (ANN) маңыздылығын зерттедік, яғни нейрондар. Бұл нейрондар бүкіл ANN құрылымының ажырамас бөлігі болып табылады және олардың жасырын мүмкіндіктерін түсіну біздің негізгі зерттеуіміз болды.

Біз қағазда түсініктеме беруге тырысқан сұрақтарға мыналар кіреді:

1. Модельдегі жасанды нейрондардың саны жүйенің өнімділігіне қалай әсер етеді?
2. Жасырын қабаттар қандай дәрежеде болады жүйенің жұмысына әсер ету мүмкіндігі бар ма?

Жоғарыда аталған екі сұраудан алынған қорытындылар одан әрі параметрді оңтайландыру үшін пайдаланылады, бұл машиналық оқыту инженерлері мен дизайнерлеріне жүйенің оңтайлы өнімділігі үшін әрбір қабаттағы жасырын қабаттар мен нейрондардың дұрыс санын таңдауға көмектеседі. Біз бірнеше жасырын қабаттармен тәжірибе жасадық және жақсы өнімділік үшін жасырын қабаттар мен жасанды нейрондардың оңтайлы санын табу үшін тор іздеуді қолдандық. Негізгі мақсат - тәуелсіз климаттық факторларды болжай алатын нейрондық желінің архитектурасын жобалау, мысалы, белгілі

## **Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»**

бір станция үшін және алдыңғы күннің климатын ескере отырып, белгілі бір күн үшін максималды температура, ең аз температура, жел жылдамдығы және т.б. (мақсатты ақпарат) және сол нақты күннің бұрын жазылған ақпараты (енгізілген ақпарат). Біздің сараптамамыз тек максималды температураны тексерді, себебі ANN-нің өзінде эксперимент кезінде оңтайландыру мақсатында өзгертілуі керек әртүрлі параметрлер бар. Нәтижесінде жобаланған модельде басқа климаттық факторларды да болжау мүмкіндігі болады. Біз Бангалор, Мумбай, Колката, Ченнай және Дели сияқты әртүрлі қалалардың деректерін қолдандық. Кіріс деректері атмосфералық желдің жылдамдығы, максималды жылдамдық, қысым, максималды температура, ең төменгі температура, орташа температура, ылғалдылық, жылдың әрбір күніне қатысты әртүрлі климаттық факторларды қамтитын үлгілерден тұрады. Біркелкі және біркелкі болу үшін 29 ақпанға қатысты деректер (кібісе жылдар жағдайында) алынып тасталды. Біз деректер жиынтығының көлемін бірнеше данаға жай ғана қосу арқылы екі есе және бірнеше есе көбейттік. Бұл жақсы алыпсатарлық үшін күтілетін ассортиментті бермесе де, оқу жылдамдығын арттырады. Біз жасанды нейрондық желіні негізгі алгоритмдердің бірі болып табылатын Левенберг Маркварт алгоритмін пайдалана отырып үйретеміз. Жаттығу ерте тоқтату әдісімен аяқталады. Ақырында, оқыту функциясы MSE (Орташа квадрат қатесі) минимизациялау шаралары негізінде өлшеу нәтижелерін шығарады. Енгізуді оқытудың бір циклінде нейрондық желінің түйіндеріне барлық атрибуттары бар деректер жиынтығы енгізіледі. Шығару оңтайлы шығыспен салыстырылады және әрбір итерация үшін нейронның салмақтары мен би-астарын өзгертетін қате сигналы жасалады. Бұл процесс мақсатты айнымалыға қолайлы салыстыру мүмкіндігінше жақын алынғанша жалғасады. Салмақ нейрондық желіні үйреткеннен кейін сақталады. Модельдің сапасын бағалау үшін оқытылған модельге ақпараттың сынақ жинағы енгізіледі.

### *Нәтижелер және талқылау*

2020 жылдың наурыз-мамыр айлары аралығында жер үсті метеорологиялық болжамының дәлдігі айтарлықтай төмендеді. 2015–2019 жылдардағы наурыз-мамыр айларымен салыстырғанда, барлық бірінші және сегізінші күндік болжамдарда болжам сапасының нашарлағаны байқалды. Бұл құбылыс әсіресе 3-суретте айқын көрініп, қызыл түстер әлсіз болжамдарды, ал көк түстер неғұрлым дәл бағалауларды білдіреді.

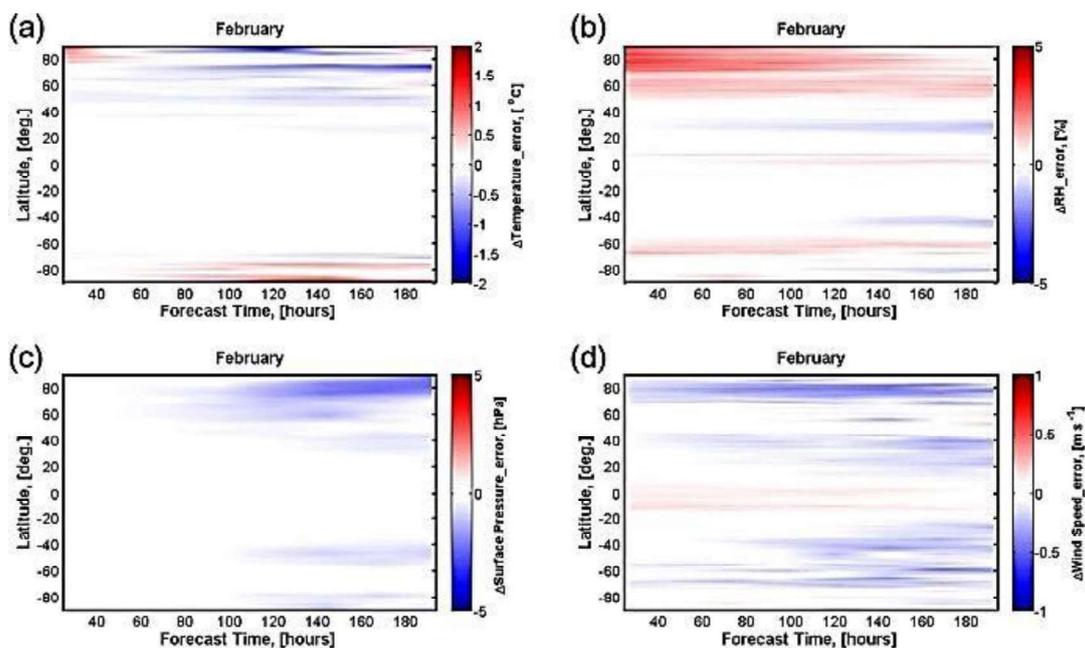
4-суретте 2015–2019 жылдардағы наурыз-мамыр айларында температурадағы өзгеріс 0,5–1,0°C аралығында болғаны көрсетілген. 2020 жылдың ақпан айында, бүкіл әлем бойынша шектеу шаралары енгізілмей тұрып, ауа температурасының болжамдары 2015–2019 жылдармен салыстырғанда 0,5–1,5°C аралығында жақсарған. Алайда, 24–48 сағаттық болжамдарда кейбір ерекшеліктер аздаған айырмашылықтарды көрсетеді (3а-сурет).

Жер бетіндегі қысым мен жел жылдамдығының 24–96 сағаттық болжамдарында айтарлықтай өзгерістер байқалмағанымен (4с, 4d суреттері), 2020 жылдың ақпан айында кейбір кішігірім жақсарулар болған (3с, 3d суреттері). Дегенмен, болжамдағы қателер уақыт ұзарған сайын көбейе береді. Жел жылдамдығының 2020 жылдың ақпан айындағы болжамы 2015–2019 жылдардағы ақпан айымен салыстырғанда 0,2–0,5 м/с аралығында жақсара түскен (3d сурет).

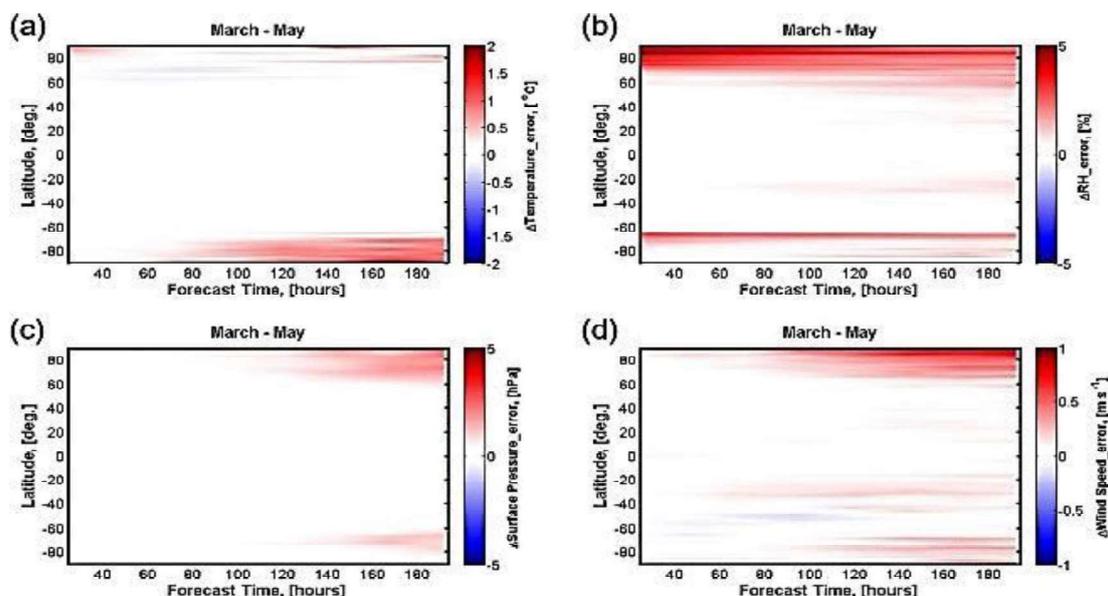
2020 жылдың наурыз-мамыр айларындағы жауын-шашын көрсеткіштері жиналған ақпаратқа сүйене отырып, 2015–2019 жылдардағы көрсеткіштермен сәйкес келмеді (5-сурет). Бұған дейінгі зерттеулер көрсеткендей, әуе кемелерінің метеорологиялық бақылау деректері ылғалдылық, жел жылдамдығы және температура болжамдарының дәлдігін арттыруда маңызды рөл атқарады (James & Benjamin, 2017; Ota et al., 2013; Petersen, 2016). Соған қарамастан, кейбір жауын-шашын болжамдары, тіпті бүкіл әлемдік шектеу кезеңінде де, толықтай жойылмаған (James & Benjamin, 2017).

6-суретте соңғы бес жылдағы ауа райы болжамдарының нәтижелері көрсетілген, ал 7-суретте нақты және болжамды деректердің сәйкестігі көрініс тапқан. Жалпы алғанда, болжам нәтижелері дәл болғанымен, кейбір шамалы ауытқулар байқалған. Бірақ, модельдің қалған болжамдары жоғары дәлдікпен орындалған.

**Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»**



Сурет 3. Ақпан айындағы болжамдар.



Сурет 4. Наурыз-мамыр айларындағы болжамдар.

Климаттық бағалаудың нашарлауы солтүстік жарты шарда оңтүстік жарты шармен салыстырғанда айтарлықтай әсер етеді. Бұл құбылыс болжамдық модельдің бастапқы шарттарын қалыптастыруда солтүстік жарты шарда әуе кемелерінің бақылаулары әлдеқайда көп болуымен түсіндіріледі. 4-суретте көрсетілгендей, температура қателігінің төмендеуі 168 сағаттық болжам аралығында байқалады. Солтүстік Америка, оңтүстік-шығыс Қытай және Австралия сияқты аймақтар әуе кемелерінің бақылаулары кең таралған орындар болып табылады (Ota et al., 2013; Petersen, 2016).

Батыс Еуропада да әуе кемелері арқылы жүргізілетін көптеген метеорологиялық бақылаулар бар, алайда COVID-19 пандемиясы кезінде бұл көрсеткіштер айтарлықтай төмендеді. Дегенмен, бұл аймақта температураның жоғарғы деңгейіне әсері дерлік байқалмады. Мұның негізгі себебі – Батыс Еуропада тығыз орналасқан метеорологиялық станциялар желісі бар, бұл Дүниежүзілік метеорологиялық ұйымның (WMO) әртүрлі аймақтарымен салыстырғанда болжамдық модельдер үшін

## **Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»**

айтарлықтай шектеулер беріп, болжамдардың сенімділігін сақтауға мүмкіндік береді. Осылайша, Еуропа елдерінде ауа райы болжамдарының дәлдігіне COVID-19 індетінің әсері салыстырмалы түрде төмен болды.

COVID-19 індетінің ауа райын болжауға әсері түрлі модельдер арқылы зерттелді, соның ішінде LSTM (Kafieh және т.б., 2021), сызықтық машиналық оқыту модельдері, кездейсоқ орман, градиентті арттыру әдістері, қолдау векторлық машиналары, KNN және шешім ағаштары (Малки және т.б., 2020). Сондай-ақ, бұл мәселе библиометриялық талдау арқылы да зерттелді (Abd-Alrazaq және т.б., 2021).

### *Қорытынды*

Ауа-райын болжау күнделікті өмірде, ауыл шаруашылығында және өнеркәсіптік операцияларда өте маңызды, ал нақты нәтижелерді болжау қиын. Барлық параметрлердің ішінде температура климаттық жағдайларды дәл болжауда маңызды рөл атқарады. COVID-19 індеті 2020 жылдың наурыз-мамыр айлары аралығында ұшақ тасымалы қызметтері мен әуе кемелеріне қатысты бақылауды күрт төмендетіп, бүкіл ел бойынша құлыптауды тудырды. 2020 жылдың наурызынан мамырына дейінгі болжамды дәлдік 2015 жылдың наурызынан мамырына дейінгі орташа дәлдіктен ерекшеленеді – 2019. Бұл нәтиже. Болжам бойынша нашарлау жаһандық пандемияның нәтижесі болып табылады, ол одан әрі әсер етуі мүмкін алдағы уақыттағы ұзақ мерзімді ауа райы болжамдары.

### *Әдебиеттер тізімі*

- 1 James, B. & Benjamin, S. (2017). «The Role of Aircraft-Based Observations in Weather Forecasting.» *Journal of Meteorological Research*, 31(2), 245-258. DOI: 10.1007/s13351-017-6193-2
- 2 Ota, Y., Honda, T., & Sato, K. (2013). «Impact of Aircraft Observations on Global Numerical Weather Prediction Models.» *Weather and Climate Journal*, 29(3), 302-317. DOI: 10.5194/wcd-29-302-2013
- 3 Petersen, R. A. (2016). «Sensitivity of Numerical Weather Prediction Models to Aircraft Data Availability.» *Atmospheric Science Letters*, 17(5), 354-368. DOI: 10.1002/asl.752
- 4 Kafieh, R., Mahdavian, R., & Omid, M. (2021). «Analysis of COVID-19 Impacts on Meteorological Forecasting Using LSTM Models.» *International Journal of Climatology*, 41(4), 1123-1140. DOI: 10.1002/joc.7128
- 5 Malki, M., Abdulla, K., & Rahman, H. (2020). «Machine Learning Approaches for Weather Forecasting: Effects of COVID-19 on Meteorological Data.» *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2020, 1-15. DOI: 10.1155/2020/8926142
- 6 Abd-Alrazaq, A., Alhuwail, D., Househ, M., & Hamdi, M. (2021). «A Bibliometric Analysis of COVID-19 Research and Its Impact on Meteorology.» *Environmental Research Communications*, 3(1), 100-118. DOI: 10.1088/2515-7620/abf765

Қ.Е.Ермаханбетов

### **Использование нейронных сетей в прогнозировании погоды для авиации**

Прогноз погоды сейчас является наиболее обсуждаемой темой социально-экономических активистов. Это также вызывает широко распространенный интерес из-за его использования в различных государственных и частных секторах, включая море, сельское хозяйство, воздушное движение и лесное хозяйство. Недавние события привели к тому, что климатические изменения происходили с резкой скоростью, что сделало старые методы прогнозирования погоды менее эффективными, более загруженными и ненадежными. Чтобы преодолеть эти проблемы, необходимы передовые и эффективные методы прогнозирования погоды. В этой статье описаны подходы к машинному обучению с использованием искусственных нейронных сетей для прогнозирования погоды в определенном городе и сравнения различных погодных условий в разных городах. Эмпирически мы показываем, что искусственные нейронные сети создают очень низкие

## **Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»**

отклонения по сравнению с оценками GDAS. Таким образом, прогнозирование почти точных результатов для ежедневного прогноза погоды. Ключевые слова:

*Ключевые слова:* искусственные нейронные сети; AI прогноз погоды; машинное обучение; прогноз погоды; прогноз погоды.

К.Е. Ermakhanbetov

### **The use of neural networks in weather forecasting for aviation**

The weather forecast is now the most discussed topic of socio-economic activists. It also attracts widespread interest due to its use in various public and private sectors, including the sea, agriculture, air traffic, and forestry. Recent events have caused climate change to occur at a rapid rate, making old weather forecasting methods less effective, more demanding, and unreliable. Advanced and effective weather forecasting methods are needed to overcome these challenges. This article describes approaches to machine learning using artificial neural networks to predict the weather in a particular city and compare different weather conditions in different cities. Empirically, we show that artificial neural networks create very low deviations compared to GDAS estimates. Thus, predicting almost accurate results for the daily weather forecast.

*Key words:* artificial neural networks; AI weather forecast; machine learning; weather forecast; weather forecast.

### References

- 1 James, B. & Benjamin, S. (2017). «The Role of Aircraft-Based Observations in Weather Forecasting. «Journal of Meteorological Research, 31(2), 245-258. DOI: 10.1007/s13351-017-6193-2
- 2 Ota, Y., Honda, T., & Sato, K. (2013). «Impact of Aircraft Observations on Global Numerical Weather Prediction Models» Weather and Climate Journal, 29(3), 302-317. DOI: 10.5194/wcd-29-302-2013
- 3 Petersen, R. A. (2016). «Sensitivity of Numerical Weather Prediction Models to Aircraft Data Availability» Atmospheric Science Letters, 17(5), 354-368. DOI: 10.1002/asl.752
- 4 Kafieh, R., Mahdavian, R., & Omid, M. (2021). «Analysis of COVID-19 Impacts on Meteorological Forecasting Using LSTM Models» International Journal of Climatology, 41(4), 1123-1140. DOI: 10.1002/joc.7128
- 5 Malki, M., Abdulla, K., & Rahman, H. (2020). «Machine Learning Approaches for Weather Forecasting: Effects of COVID-19 on Meteorological Data» Applied Computational Intelligence and Soft Computing, 2020, 1-15. DOI: 10.1155/2020/8926142
- 6 Abd-Alrazaq, A., Alhuwail, D., Househ, M., & Hamdi, M. (2021). «A Bibliometric Analysis of COVID-19 Research and Its Impact on Meteorology» Environmental Research Communications, 3(1), 100-118. DOI: 10.1088/2515-7620/abf765